

AZ ERŐSÖDŐ SAVASODÁS HATÁSA A TERMÉSZETES ÉLŐVILÁGRA*

Mielőtt néhány tényleges példa és adat felvázolásával bemutatnánk a környezet fokozódó savasodásának a természetes élővilágra gyakorolt — és eddig felismert — hatásait, tömören felsoroljuk azokat az *alapvető tényeket*, amelyeknek elfogadása szükségszerű az egész kérdéskör *súlyának mérlegelésénél*.

- Az élőlények (mikroszervezetek, állatok, növények) összessége alakította ki a földi bioszférát, amelyben az evolúció során az ember — mint biológiai lény — kifejlődött és létezik.

- Az élőlények igen nagy faji változatosságban és (szemmel láthatóan vagy csak mikroszkóppal láthatóvá téve) felmérhetetlen nagyságú egyedszámban élnek együtt, szoros kapcsolatban egymással, s így az emberrel is. Biztosítják azok fennmaradását. Nélkülük megszűnne pl. a táplálkozás, az emésztés, az anyagcseretermékek és holt szerves anyagok lebomlása és cirkulációja. Ha valami okból hirtelen elpusztulnának Földünkön pl. csak a baktériumok (vagy csak a mikrogombák), követné azt az összes többi élő (beleértve az embert is) halála, a Föld hamarosan élettelen bolygóvá válna.

- Az élőlények közösségeinek együttélése adott élőhelyük (környékük) ténylegesen ható biotikus és abiotikus tényezőivel, igen hosszú idők alatti alkalmazkodási folyamat eredménye. A közösségek túróképességi tartománya és a ható tényezők között létrejött szabályozottság biztosította és biztosítja ma is az ún. „ökológiai stabilitást”, amely lehetővé teszi az ember számára is egészséges életfeltételek fennmaradását. Ha a ható faktorokban történő változások túllépi az élőközösségek tolerancia-határait, olyan eltolódásokat okoznak az adott élőlény-környezet-rendszer mennyiségi és minőségi viszonyaiban, amelyeket leghamarabb és legbiztosabban az élőlények és együtteseik jeleznek.

- Az emberiség műszaki-technikai téren felgyorsuló cselekvései, különösen az utóbbi évtizedekben, a hatótényezők némelyikében olyan globális jellegű gyors változást (felerősödést, gyengülést) indítottak el, amely miatt a korábbi idők ökológiai értelemben vett „stabil” élőközösségei kezdenek „labilissá” és sérülékennyé válni. E folyamatokat egyre gyakrabban az emberi társadalmak szempontjából kedvezőtlen változásoknak lehet ítélni.

- A megzavarás után az élőközösségek (populációk, társulások) önszabályozásra való képessége („ökológiai homeosztázis”) gyakran nem tud már helyreállni. A közösségek „kompartimentjei” közötti strukturális és funkcionális kapcsolatokban „törések”, „hiányok” lépnek fel. Ez egyes populációk robbanásszerű egyedszám-növekedéséhez, mások teljes eltűnéséhez vezet.

* A magyarországi savas esők és ülepedések légköri kérdéseiről Mészáros Ernő adott összefoglalást a Magyar Tudomány 1984/7–8. számában. E cikkben az MTA–OKTH közös akciójaként létrehozott „A környezet erősödő savasodása” bizottság anyagából a természetes élővilágra gyakorolt hatásáról szólunk, magyarországi példák alapján. Az anyaghoz rész-adatokat szolgáltattak még Dévai I., Fekete G., Kovács M., Simon T.

● Azoknak a folyamatoknak (pl. műtrágyázás, kemizáció, trópusi erdők faanyagának gyors kinyerése, a fosszilis tüzelőanyagok felgyorsuló égetése és ezek következményei, a levegő és a vizek szennyezetté válása stb.), amelyeket az emberiség általában a saját jobb élete érdekében indított el, s most már egyre nagyobb dimenziókban és egyre gyorsuló ütemben végez, hatásai napjainkban mind látványosabban észrevehetőek az élőlények közösségeinek visszajelzése alapján. A negatív hatások — részben akkumulációjuk miatt is — ma már egyre sűrűbben lépik át az élőközösségek tűrőképességének határait, a károk részben folyamatosan, részben hirtelen és látványosan egyre gyakrabban jelentkeznek. Sokan már bioszféra krízist emlegetnek s mondjuk ki, nem teljesen jogtalanul.

● Ezen felgyorsuló antropogén eredetű folyamatok közé tartozik a levegőbe jutó szennyezőanyagok mértékének megnövekedése és a növekedés folyamattossá válása. A rendkívül sokféle légszennyező közül a kén- és nitrogénoxidoknak a közvetlen és közvetett káros hatásait az emberiség már kezdi felismerni, de még egyáltalán nem hiszi el azoknak katasztrófákat sejtető jelentőségét.

● A többi levegőbe jutó szennyezőanyag — többszáz, főleg szerves eredetű molekula — szintén nedves (eső) vagy száraz ülepedéssel jut el az élőkhöz. Az élőszervezetekre ugyanúgy lehetnek közvetlenül toxikusak, vagy közvetetten károsak, mint a már közismertnek tekinthető kén- és nitrogénoxidok. Kevés azonban az ismeretanyag ezen légszennyezők lebomlási idejéről, katalitikus, szinergikus és akkumulációs képességükről és főleg az élőszervezetekre gyakorolt tényleges hatásairól. Amikor jelen anyag „savas” levegőszennyezőiről beszélünk, emiatt külön hangsúlyozzuk, hogy a levegőszennyeződésnek az élőkre gyakorolt káros hatását elvileg mindig az összes légszennyező- anyaggal együtt lenne kívánatos értékelni!

A savasodás hatása az élőszervezetekre, populációikra, társulásaikra

A légköri szennyező anyagok az élőszervezetekre, ill. azok populációira, társulásaira közvetlenül vagy közvetetten (áttételesen) hatnak. Az alanti áttekintésben elsősorban a növényekre gyakorolt hatásokról adunk összeállítást, a *természetes* állatvilágra és mikroorganizmusokra gyakorolt hatást hazánkban még alig vizsgálták. Anyagunkat két nagy fejezetre tagoltuk, a közvetlen, ill. a közvetett hatások csoportjaira, hangsúlyozva azonban itt is, hogy ezek a valóságban igen gyakran együttesen jelentkeznek.

A savasodásnak az élőszervezetekre gyakorolt hatásairól megjelent nemzetközi irodalom könyvtárnyi, idézésüktől emiatt el kell tekintenünk. Inkább arra törekedtünk, hogy példáinkat hazai közölt, vagy még nem is publikált konkrét kutatási eredmények alapján, a legfrissebb tudásunk szerint állítsuk össze.

A közvetlen hatás

Közvetlen hatásról akkor beszélünk, ha a légszennyező anyagok (pl. kén-dioxid-molekulák) bejutva az élőszervezetbe, olyan kémiai folyamatokat indítanak el, amelyek toxikus hatásuk, vagy ion-kicsérélő mechanizmusuk révén megzavarják a sejtek normális működését. A növényi asszimiláló szervek (levelek) közvetlen károsodását számos olyan kísérlettel igazolták, ahol általában rövid életű vagy fiatal növényeket zárt kamrákba tettek ki szennye-

zett levegő hatásának. Így pl. bizonyították azt is, hogy a levegő SO_2 koncentrációjának növekedése a klorofill pusztulása révén gátolja a fotoszintézis folyamatát, károsítja a levelek szöveti állományát, kedvezőtlenül hat a szállító szövetrendszerre és gátolhatja a virágpör képződését.

Az SO_2 tartalmú gáz a növények leveleinek légzőnyílásán jut be a szervezetbe és ott a sejtközötti járatokban levő víztartalmú közegben — az adott pH és egyéb abiotikus viszonyoktól függően — szulfitionná, hidrogénszulfittá vagy kénessavvá alakul. A sejtbe jutva a klorofill Mg-ionjait H-ionokra lecserélheti, megváltoztatva ezzel annak szerkezetét és működését. Aktivizálhatja a klorofilláz enzimet is, amely tovább bontja a klorofill molekulát. Gátolva a karboxiláz-enzimeket, az elsődleges CO_2 -fixáción keresztül közvetlenül is gyengítheti a fotoszintézis erősségét (hatékonyságát).

A legújabb irodalmi adatok azt hangsúlyozzák, hogy a kén-dioxid közvetlen hatásában a legveszélyesebb molekuláris folyamat az, hogy az autooxidáció során szeretlen szabadgyök-reakciók indulnak meg. Ezek folyamán különböző aktív oxigén-formák, mint hidrogénperoxid, szerves peroxidok, szuperoxid-gyök, szingulett oxigén, hidroxil-gyök és más, a szervezetre potenciálisan szintén igen veszélyes termékek keletkeznek. E termékek pl. oxidálhatják a membránok telítetlen zsírsavait; az így kialakuló membrán-átjárhatóság igen sok élettani funkció szabályozását gyengíti. Emiatt módosulnak olyan folyamatok, mint a légzés, a víz- és ionösszetétel-, a fotoszintetikus szabályozottság. Mai kifejezéssel élve tehát az SO_2 mérgező hatása — legalábbis nagyrészt — „gyökpatológiai jelenség”.

Itt jegyezzük meg, hogy a légszennyező anyagok másik ismert nagy csoportja (nitrogén-oxidok) felelős elsősorban a légköri ózon felszaporodásában, amely hatását az előbbihez hasonló gyökreakciókon keresztül fejti ki. Sőt, az újabb kutatások szerint az SO_2 és az O_3 hatása egymást erősítve jelentkezik, így gyorsítja a savhatást.

A gyökreakciók káros hatásai ellen a szervezet védekezik. A védekezésben elsősorban a mikrotápelemekben (Fe, Mn, Cu, Zn) gazdag kismolekulájú, ún. antioxidáns vegyületek (egyrészüik vitamin), és más komplexképző anyagok jelentősek. A mikrotápelem-hiány vagy azoknak éppen a savhatás miatti csökkenése a gyökreakciót elindító anyag (pl. SO_2) mérgező hatását fokozza.

A savasodás közvetlen hatása a természetben elsősorban ipari göcökben, városi körzetekben és szűkebb környékükön jelentkezik feltűnően.

A közvetlen hatás legismertebb indikátor-szervezetei a *zuzmófajok*. A zuzmók klorofill-tartalmú zöld algák és klorofill nélküli gombák szimbiózisából létrejött szervezetek. Már több mint 100 éve megfigyelték és leírták azt, hogy a széntüzelésű lakások füstgázai egyes zuzmófajokat károsítják, vagy elpusztítják. Laborkísérletekkel is igazolták, hogy e károsodások mind alak-, ill. színváltozásban, mind élettani, biokémiai és sejtteni vonatkozásban kimutathatók.

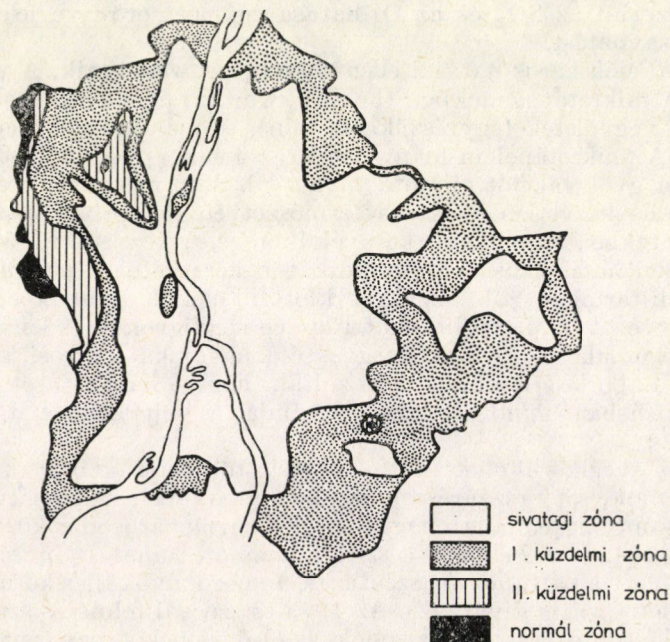
Az 1950-es évek körül elkészítették a világ több országában a nagyvárosok, ipari centrumok, sőt országrészek ún. zuzmóterképeit, korrelációt találva a levegő SO_2 -koncentrációjának nagysága és a zuzmókárosodás között. Hazánkban először 1942-ben *Felföldy* készített zuzmóterképet Debrecen városáról, bizonyítva, hogy a pályaudvar (széntüzelésű mozdonyok!) és környéke zuzmómentes terület („zuzmósvatag”). Az 1979-es szegedi felmérés szerint a város centrumából eltűntek a fatörzs-zuzmók, az első telepek csak a centrumtól több, mint 4 km-es távolságban találhatóak meg.

A télen is intenzív anyagcserét folytató zuzmók fejlődését főként a szmogos időszakok gátolják annyira, hogy e fizioológias kiesést a nyári „tisztább” levegő mellett sem tudják már pótolni. A fővárosban a $0,10 \text{ mg/m}^3 \text{ SO}_2$ -koncentrációjú zónákban (KÖJÁL-mérések) zuzmósivatag van, ezektől kifelé haladva fokozatosan jelennek meg bizonyos kéregzuzmók, egyes lombos-zuzmók és még távolabb a bokros-zuzmók, de a kertváros jellegű peremkerületekben is alig van ma már zuzmó (1. ábra). Hazai ipari centrumaink és hőerőműveink körzetében is kialakultak a zuzmósivatagok, pl. a Gagarin Hőerőmű körzetében teljesen eltűntek egyes zuzmó-populációk.

Hangsúlyozni kell azonban azt is, hogy a sok zuzmófaj között található SO_2 -re rezisztens, vagy kevésbé érzékeny fajok is. Így az is előfordulhat, hogy egy-egy rezisztens faj populációi elfoglalják az eltűnt fajok helyét, és sűrű borítású állományokat alkotnak erősen szennyezett levegőjű területen is.

Miután az élőszervezeteknek az SO_2 -dal szembeni érzékenysége fajlag is eltérő, az egyedfejlődés stádiumaitól függően is változik, a természetben vizsgálatuk igen nehéz. Az bizonyos, hogy pl. a lombhullató, mérsékeltövi erdőben, az évenkénti lombhullás miatt e károk kisebb mértékűek, mint pl. az örökzöld, többéves lombú fenyőféléknél. A tavasszal kihajtó új lomblevél ugyanis „tisztalappal” fogadhatja az az évi savasító hatásokat. E helyen csak utalunk arra, hogy a levelekre rakódó szilárd ülepedés (por, korom stb.) egy része a savas, nedves vagy száraz ülepedések közvetlen hatását csökkentheti.

Hazai megfigyelések szerint nem, vagy alig mutat közvetlen károsodást a levegő SO_2 -hatására pl. a burgonya, hagyma, zab stb. Eléggé tűri a fagyat, a nyír, a nyárak, a platán, az ezüstfenyő, az örökzöldek. Igen érzékeny viszont a



1. Budapest zuzmó-térképe az 1982-es állapot szerint (Farkas E. mscr.)

közvetlen kén-dioxid szennyeződésre a vörösfenyő, a jegenyefenyő, a lucfenyő, a bükk, a gyertyán, a hárs, természetett növényeink közül pedig a lóhere, árpa, búza stb.

Külső jelei szerint a növények levelein a kén-dioxid károsodás akut vagy krónikus lehet. Akut hatásnál a károsodott részek szélein és az erezet között fehér-csontszínű, néhány fajnál barnás elváltozások lépnek fel. A krónikus mérgezést jelzi, hogy nem az egész levél, hanem pl. csak a sejtek egy része károsodott, a szín a sárgától a barnás-vörösön át a fehérig változhat. Tartós hatás esetén az alacsonyabb koncentráció is káros lehet, s létrehozhatja a növény pusztulását.

A közvetett (áttételes) hatás

Általánosságban közvetett vagy *áttételes* hatásról akkor beszélünk, ha a külső faktor (jelen esetben pl. a levegő kén-dioxid- és nitrogénoxid-többlete) először valamelyik másik külső tényezőcsoportban (pl. víz, talaj) indít el olyan változás-folyamatokat, amelyek azután az élőszervezetek tűrőképességi tartományára már közvetlenül és ténylegesen hatnak.

A közvetett hatások közös jellemzői közül kiemeljük, hogy:

— rendszerint nehezebben ismerhetők fel, mert a jobban megfigyelhető élőközösségek — többnyire a tápláléklánc zavarain keresztül — időben csak később jelentkeznek;

— jelentős szerep jut bennük az akkumulációknak és a közvetlenül érintett terület toleráló-pufferoló képességének;

— a hatáskapcsolódások először (az esetek többségében) a szabad szemmel nem látható mikroorganizmus populációk károsításával indulnak, zavart okozva a táplálékhálózatokban, elemcirkulációkban, a versengés (kompetíció) szabályozottságában stb.

— gyakran jelen van egyidejűleg a közvetlen károsítás is, amely a közvetett hatás felismerését eltakarhatja vagy megnehezíti;

— bizonyításuk bonyolult ökológiai kutatásokat igényel, amelyeknek ki kell terjedniük az adott terület abiotikus és biotikus hatóképes faktorainak feltárására, a hatásfolyamatok és az élőközösségek tér—időbeni védekezési képességeinek megismerésére is.

Hatás a vizeken keresztül. A vizeken keresztül történő közvetett hatásról jelen összeállításban csak rövid említést teszünk, mert a hazai vizeink többségére gyakorolt savasító hatás eltér a sokat emlegetett és idézett észak-európai és kanadai víztereken kimutatott hatásoktól. Ennek okát vizeink viszonylag magas sótartalmában, ezen belül is a karbonát, ill. hidrogénkarbonát tartalmában kereshetjük. Ez okozza ugyanis azt, hogy hazai vizeink nem savanyodnak el úgy, mint a skandináv tavak, s pufferkapacitásuk olyan mértékű, hogy az esetek többségében az elkövetkezendő időben sem kell számolni a kizárólag a pH csökkenéséből levezethető károsodásokkal.

A jobb érthetőség kedvéért vegyük pl. szemügyre egy sekély tóba jutó, ill. az onnan távozó kén legfontosabb útjait.

A sekély tavakba jutó kén három forrásból származik: a felszíni hozzáfolyásból, a talajvízből, valamint a nedves és száraz ülepedésből. Az így bejutó kénmennyiség legnagyobb része szulfát formájában érkezik, de feltétlenül említést érdemel a levegőből abszorbeálódó kén-dioxid, a folyóvizek által szállított

szerves kötésű kén (élő szervezetek, anyagcseretermékeik és maradványaik), valamint az élőlényekben és a talajvizekben — ha nem is számottevő mennyiségben, de — minden bizonnyal előforduló részlegesen oxidált szervesen ként tartalmazó vegyületek.

Sokkal változatosabb útjai lehetnek a kén eltávozásának a víztérből. Ha a felszíni lefolyás mennyiségileg jelentős, akkor a kén zömmel ezen az úton távozik, mégpedig szulfát, szerves kötésű kén, ill. kisebb mértékben részlegesen oxidált szervesen ként tartalmazó vegyületek formájában. A sekély vizeknél feltétlenül figyelmet érdemel a változó irányú talajvízmozgás következtében a szulfát, ill. részlegesen oxidált szervesen ként tartalmazó vegyületek formájában kijutó kén mennyisége is. Igen jelentős lehet az üledékben az oldhatatlan fém-szulfátok (elsősorban CaSO_4), ill. fém-szulfidok (főleg FeS és FeS_2) formájában kicsapódó, valamint az elemi kén formájában kiváló kén mennyisége, továbbá az üledék felszínén felhalmozódó holt szerves anyagok kéntartalma is. Nem elhanyagolható, különösen az elmcosarasodó, gazdag szerves-anyag felhalmozódású, erősen reduktív sekély vizekből a légkörbe kén-hidrogén, ill. illó szerves anyagok formájában eltávozó kén mennyisége sem.

Az előzőekből egyértelműen következik, hogy hazai sekély, többnyire gyakran és teljesen felkeveredő vizeinkben a nedves és száraz ülepedéssel a vízbe jutó kén (de természetesen ez a nitrogén formákra is igaz), csak a bonyolult rendszer egyik, bár napjainkban egyre fontosabb összetevője. A szárazföldön elsősorban savasodást előidéző, s vizeinkbe a nedves és száraz ülepedéssel, ill. közvetlen vízszennyezéssel bejutó kén és nitrogén vegyületek az anyagforgalmi folyamatok katalizálása révén elsősorban vizeink eutrofizálódását gyorsítják. Ez viszont igen fontosabb teszi, hogy a kén és nitrogén formák vizeinkbe való bejutását minimálisra szorítsuk, hiszen jelenleg a természetes vízi élővilág megőrzése, ill. vizeink minőségének megóvása érdekében e témakörben ez a legfontosabb feladat.

Hatás a talajon át. A talajon keresztül történő közvetett hatást elsősorban a természetes növénytakaró (pl. erdők) példáján mutatjuk be. A kérdés összetettsége miatt röviden ismertetnünk kell az erdők talajában bekövetkező kémiai változásokat.

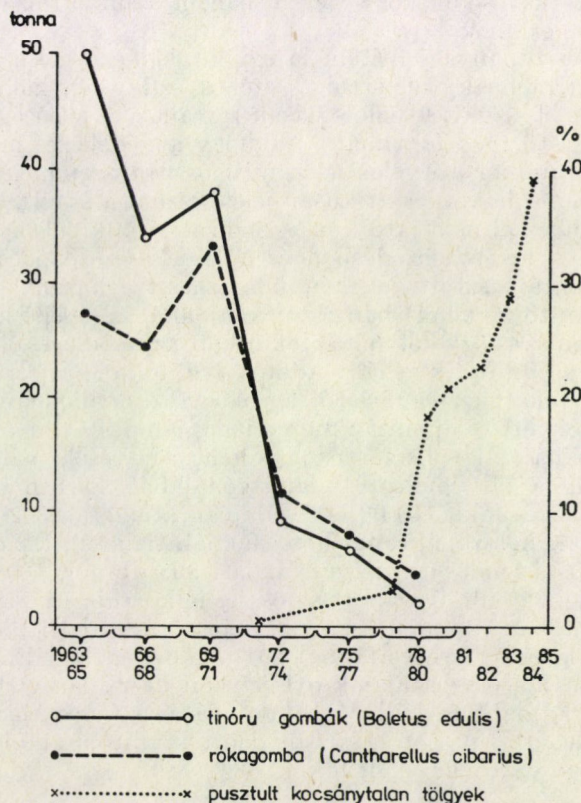
A levegőbe jutó kén- és nitrogén-oxidok nagy távolságokra is eljutva, bekerülhetnek az erdőkbe. Ott vagy a leveleken, törzseken vagy az avaron rakódnak le először. Innen lemosódva, ill. az avaron átmosódva kerülnek be a talaj felső rétegeibe, ahol az erdő növényeinek víz- és táplálékfelszívása történik. A Déli-Mátrában 1965-ben végzett, majd 1984-ben megismételt vizsgálatok azt mutatják, hogy az elmúlt 20 év alatt a fák leveleit érő közvetlen savhatás miatt csökkent a fák leveleinek pufferolási képessége. A levelekben kevesbedő alkálifém, és alkáli-földfém koncentráció miatt a lehulló levél (avar) pufferképessége is csökkent, s így a közvetlen talajfelszínre jutó csapadék pH-ja akár 1 értékkel is alacsonyabbá vált.

Az avaron át a talajba jutó és a korábbi időknél nagyobb koncentrációjú szennyezőanyagok a talajok kialakult ion-egyensúlyát megbontják, hidrogén-ion koncentrációjuk a savgyökök reakcióinak hatására növekszik, vagyis maguk a talajok is mérhető módon savanyodnak. Az utóbbi évtizedekben folyamatosan vagy lökészerűen plusz savhatást kapó talajok egy részében ezen akkumulálódó folyamat révén megváltozott az ion-egyensúly, gátlódott és gyengült a talaj pufferkapacitása. E folyamatot erősítette pl. az eruptív

kőzetek (riolit, andezit stb.) felgyorsult hidrolizises mállása. Ennek egyik következménye a talajok kovasav és alumínium-tartalmának növekedése.

Az elsavanyodó talajban levő olyan elemek, amelyek addig az élőlények tűrési tartományaira közömbösek voltak, hirtelen vízben oldódóvá és ezzel felszívhatóvá váltak. Az Al és egyes nehézfémek (Fe, Mn) kationjai részben toxikusak egyes élőkre, részben a talaj abszorpciós egyensúlyában a kémhatást maguk is tovább befolyásolhatják. Közben a kation-kicserélődési folyamatban fontos tápelemek, pl. a Ca, Mg, K eltűnnek a gravitációs vízzel a talaj gyökér-felszívó zónájából. A talajsavanyodás igen bonyolult kémiai reakcióinak változatos útjait most nem ismertetve azt hangsúlyozzuk, hogy az ilyen típusú gyors változásokat a talajban élő populációk igen nehezen tűrik, az adaptációs mechanizmusuk sem tudja követni a hirtelen átalakulásokat.

A savanyodás, a toxikus nehézfémek és Al-vegyületek hatására sok fontos, a dekompozíciót, mineralizációt végző mikroszervezet elpusztul, de inaktívvá válnak a víz- és tápanyagfelvételben egyes szervezeteknél döntő *mikorrhiza-gomba kapcsolatok* is. Hogy ez a levegő kén- és nitrogén-oxidjaiból kiinduló talajátalakító hatás hazánkban is kezd akumulálódva felerősödni,



2. A szabadban termett mikorrhiza-gombák forgalomba hozott mennyiségei a fővárosban, 3 évi átlagok tonnában (*Konecsni I.* nyomán) és a Síkfőkúti fapusztulás üteme %-ban (*Jakucs P. mscr.*)

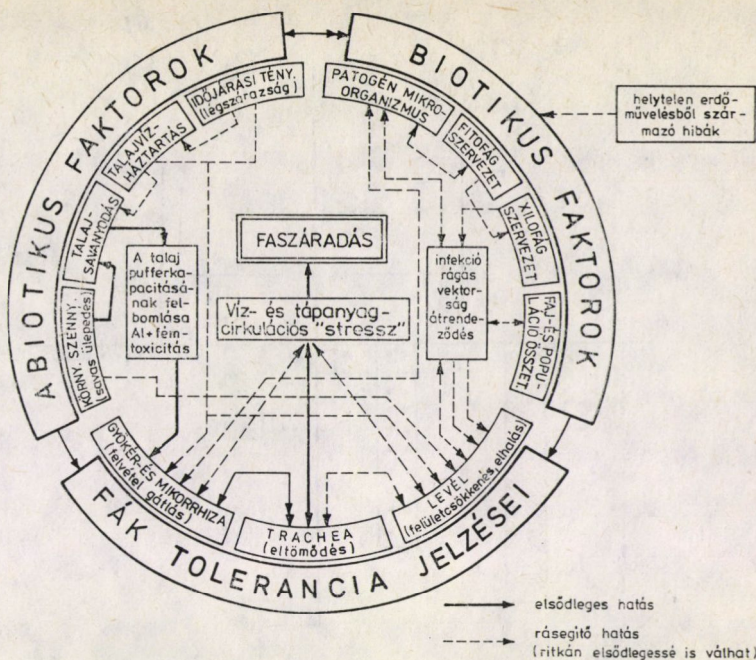
jelzik pl. a *mikorrhiza-gombák* termőtestjeinek eltűnései. Igen sok tájunkon eltűnt vagy megritkult pl. a róka-gomba, a trombitagomba vagy a tinóru-gomba (2. ábra). De a mikorrhiza-gomba fonalak inaktívvá válását jelzik azok a magasabb rendű növények is, amelyek anyagcseréjéhez és vízfelvételéhez ezen gombák hifa-fonalaival való szimbiotikus kapcsolat hozzátartozik. Így pl. az utóbbi évtizedben mintegy felére fogyatkoztak orchidea és tárnicsféléink, pedig ezeknek minden faja és példánya szigorúan védett. A 20–25 évvel ezelőtti vizsgáló helyeken megismételt növénytársulástani felvételek bizonyossága szerint, főleg a nem mészkező alapkőzeten álló erdőkből eltűnt igen sok bazifil jellegű légyszárú növény (vagy populációk megritkultak), helyüket részben savanyodást jelző növények (pl. orvosi veronika, perjeszittyó) vagy nagy tűrőképességű gyomok foglalták el.

Az élővilág evolúciója során több *erdőalkotó fánk* esetében is létrejött a fa-gomba szimbiózis. A kocsánytalan tölgyünk pl. tipikusan olyan fa, amelynél a szimbiota-gombák fonalai — különösen száraz időperiódusokban — szorosan összekapcsolódnak a fák hajszálgyökérzetével, három-négyszeresére növelve ezzel a víz- és tápanyagfelszívó rendszert. Napjainkban a felgyorsuló talaj-savanyodás összetett jellegű közvetett hatása miatt nemcsak a fák felszívó hajszálgyökérzete károsodik közvetlenül, hanem a mikorrhiza-kapcsolatok is gátolt állapotba kerülnek.

A gátolt víz- és tápanyagfelvételű fa egyik védekező mechanizmusa a vízszállító járatok (tracheák) keresztmetszetének szűkítése, különböző gélszerű tömőanyagokkal. E szűkítés fiziologiásan ugyanaz a jelenség, mint az őszi lombhullás idején történő folyamat. Csakhogy a védekezés már tavasszal és nyáron történik, amikor a levelek asszimilációs, transzspirációs tevékenysége a legerősebb lenne. A hatás drasztikusan jelentkezik a fa hirtelen elszáradásában, vagy a levélhez el nem jutó fontos makro- és mikroelemek szállításának elakadása miatt a levélszíneződésben és a fa stressz-állapotba kerülésében. Vizsgálatokkal alátámasztott véleményünk szerint a hazánkban hirtelen fellépő kocsánytalan-tölgy elhalásban és más fajoknál is fellépő károsodásokban egyre erősödőbb ez a közvetett hatás tekinthető az elsődleges oknak (3. ábra).*

Csak kiragadva mutatunk néhány adatot a Síkfőkút Projecten történt vizsgálatokból, amelyeket két egymástól távol levő erdőállomány egészséges és beteg tölgyfái alól vett talajminták mérései alapján állítottunk össze (4. ábra). A talajban levő hajszálgyökérzet és mikorrhiza-mérések, valamint a talajanalízisek mindig a fák lombszél alatti zónájából, körben vett mintákból történtek. Egészséges fáknál 1000 cm³ talajban átlagosan 302 cm volt a hajszálgyökerek összes hossza, ugyanez beteg fáknál átlagosan 132 cm. Az egészséges hajszálgyökér-végződés egészséges fa alatt 898 db volt 1000 cm³ talajban, beteg fa alatt csak 326 db. Ugyanott az összes mikorrhiza egészséges fák esetében 1000 cm³ talajban 729 cm hosszú volt, a beteg fák alatti talajban 223 cm. Az aktív mikorrhiza egészséges fáknál 261 db, beteg fáknál 55 db 1000 cm³ talajban. Bemutatjuk még a talajok pH-értékeit desztillált vízben és KCl-ban mérve, valamint a talaj Ca/Al, ill. Mg/Al arányát és a Ca és Al koncentrációkat is. Az ábrán feltüntettük a törzs eltömődött szállítójáratainak százalékeit, megjegyezve, hogy ez a már elhalt fáknál 88% volt.

* A kocsánytalan tölgy pusztulásával foglalkozott a folyóirat ez évi 6. számában Igmándy Zoltán tanulmánya is (1985/6. 456. o.), bár az ökológusok véleménye a pusztulás elsődleges okai tekintetében eltér az abban foglaltaktól.



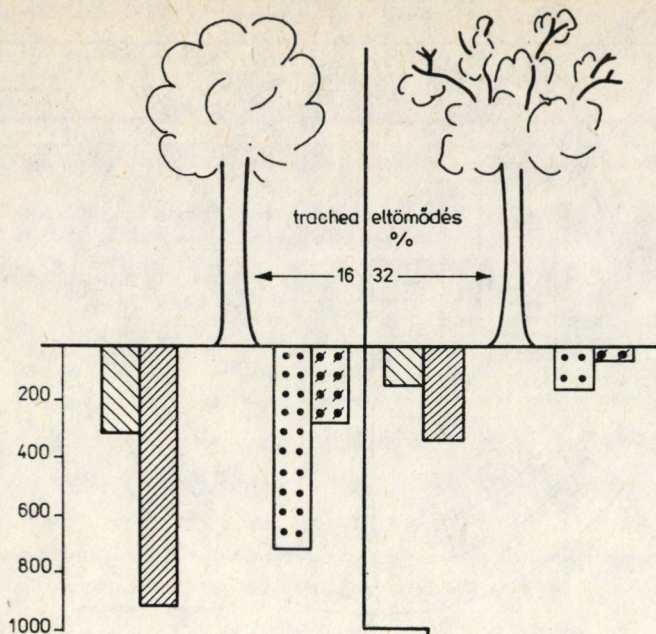
3. A faszáradás okának ökológiai értelmezése a hatóképesnek minősíthető faktorok (károsítás) és a tolerancia (károsodás) kapcsolatában (Jakucs, 1983)





A stressz-állapotba került, legyengült, beteg fáknál igen sok másodlagos hatás jelentkezhet, de ez az ún. kárláncolat már csak gyorsíthatja az elsődleges hatás által kiváltott pusztulási folyamat gyorsabb befejeződését.

A savasodás közvetett hatását hazánkban az Eger melletti „Síkfőkút Project” kutatási területen részletesen vizsgáltuk. Az ottani tölgyes erdő társulásnak az elmúlt 6 év alatt közel 40%-ban haltak el a fái (lásd. 2. ábra). A faelhalás mind a fitomassza gyarapodásában, mind az éves produkció alakulásában visszatükröződik. Az elpusztult fák fitomasszája szárazanyagban kb. 50 t/ha; ez sokkal kevesebb, mint a megmaradt fák 1973 óta történt 10 éves gyarapodása (39 t/ha). A fapusztulás az éves produkciót is lecsökkentette az erdőben, jelenleg minden évben kb. hektáronként 300–350 kg-mal termel kevesebb szerves anyagot az erdő, mint korábban.

Az elhalt fák hiányzó lombját a még élő fák nagyobb koronafejlesztése részben pótolja, a korábbi teljes levélfelületi index (8,29 ha/ha) azonban így is kb. 2 ha/ha értékkel csökkent. Az elvesztett lombzáródás árnyékoló hatását a cserjeszint egyes gazdaságilag értéktelen populációinak felmagasodása és fatermetűvé válása csak kis mértékben pótolja. Miután az elhalt értékes tölgyek még kivágásuk esetén sem újulnak fel sarjról, a fapusztulás előrehaladásával várható, hogy a káros környezeti hatásokat egyelőre még eltűrő, gazdaságilag azonban kevésbé értékes fák cserélik le tölgyeseinket belátható időn belül.

A fapusztulással kapcsolatos erdő-struktúra átrendeződési folyamatban a másik igen feltűnő jelenség az erdő egyes cserjéinek (fagyal, kecskerágó, som) számbeli megfogyatkozása, valamint a lágyszárúak egyedszám-csökkenése.



Jelmagyarázat:	Talaj		
 gyökérhossz cm/1000 cm ³	5,01	4,84	pH _{H₂O}
 gyökérvég db/1000 cm ³	3,83	3,67	pH _{KCl}
 aktív mikorrhiza db/1000 cm ³	6,43	1,09	Ca/Al _(KCl)
 összes mikorrhiza db/1000 cm ³	1,43	0,58	Mg/Al _(KCl)
	1,19	0,36	Ca _{HCl} mg/g
	2,11	0,78	Ca _{KCl} mg/g
	0,45	0,72	Al _{KCl} mg/g

4. Egészséges és beteg fák, valamint talajaik néhány adata Síkfőkúton és környékén (Jakucs, 1983)

A talajt egyre inkább vastagodó avartakaró borítja, még nyár közepén is szinte ép, előző évi levelekkel. E tény egyértelműen jelzi a lebomlási folyamatok zavarát.

A fák pusztulása miatt módosult az erdő egykori stabil rövidhullámú sugárzási mérlege, albedója, sugárzási- valamint csapadékvíz-visszatartása. Az erdő belsejébe a korábbinál lényegesen több sugárzás jut be. Különösen a száradási góciókban a meleg napokon mikroklimatikusan meleg (hő-)szigetek lépnek fel, éjszaka viszont innen erősebb a kisugárzás. E mozaikosság befolyásolja az egész állományklimát.

Végeredményben a megindult károsodás az egész társulás strukturális és anyagforgalmi szervezettségét megbontotta úgy, hogy a továbbiakban már ez is elindít olyan folyamatokat, amelyek az erdő fokozódó értékcsökkenését fogják jelenteni.

A károk becslése, a védekezés lehetőségei

A természetes élővilágban a levegőszennyeződésből eredő károk becslése igen nehéz. A hivatalos adatok szerint pl. az 1979 óta elpusztult tölgyfák értéke 1983-ig meghaladta az 1,2 milliárd Ft-ot. A védett növények pusztulását továbbá az élőközösségek stabilitásában és produktívitasában bekövetkezett károkat még becsülni sem tudjuk. Egyes országokban az erdőpusztulások immateriális jellegű kárát az elpusztult faérték harminc-negyvenszeresére becsülik. A legnagyobb kár azonban minden kétséget kizáróan az a destabilizációs hatás, amelynek folyamán ma még nem vizsgált élőszervezetek esnek ki azokból a kapcsolathálózatokból, amelyek végső soron az egészséges emberi élet sokoldalú, fontos biztosítói.

A védekezés lehetőségei:

- azoknak az ökológiai kutatásoknak országos méretű összehangolása és kiemelt támogatása, amelyek a tényleges hatásfolyamatok megismerésére törekcszenek;
- szükséges az egységes ökológiai mérőhálózat és információsrendszer kifejlesztése, működtetése, az élők indikációjának időbeni felismerésére;
- intézkedéseket kell tenni a levegőbe jutó és savasodást okozó anyagok mennyiségének gyors visszaszorítására. (A Minisztertanács már határozatot hozott arra vonatkozóan, hogyan kapcsolódjunk az ilyen irányú nemzetközi törekvésekhez);
- fel kell kutatni és el kell terjeszteni a károsodó és pusztuló populációkban és társulásokban a rezisztens törzseket, ill. vonalakat;
- kutatni, kipróbálni és alkalmazni kell a talaj pufferkapacitásának felbontását megakadályozó meliorációs tevékenységeket.

*

A légszennyeződésből eredő savasodásnak a természetes élővilágra gyakorolt hatásait (különösen a soktényezős reakciók eredményeként jelentkező át-tételes hatásokat) Magyarországon hazai kutatásokkal és a védekezés módjának helyi sajátosságait figyelembe véve lehet csak megoldani. Külföldi példák és kutatási eredmények e téren alig adaptálhatók, ezért ezek ismerete (tanulmányozása) szükséges ugyan, de nem elégséges. A Kárpát-medence sajátos adottságaiból következik, hogy mind az abiotikus és biotikus hatóképes tényezők, mind az e hatásokat fogadó élőközösségek másként fognak viselkedni, mint a világ többi pontján.